

## 激光与光电子学进展

## 轨迹可控的大深径比倒锥微孔加工系统及应用

王珊<sup>1,2</sup>, 赵卫<sup>1</sup>, 赵华龙<sup>1\*</sup>, 周峰<sup>3</sup>, 刘国强<sup>4</sup>, 杨小君<sup>4\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>中国一汽无锡油泵油嘴研究所, 江苏 无锡 214063;<sup>4</sup>西安中科微精光子制造科技有限公司, 陕西 西安 710119

**摘要** 飞秒光纤激光器具有脉宽极短, 瞬时功率高, 对加工材料无选择性等特点, 被广泛应用于精密微孔制造领域。为此, 提出了一种高精度轨迹可调光束扫描系统, 利用电机控制偏转光楔组和平行平板组相对于激光光轴的角度, 再通过聚焦透镜缩小光斑, 实现精准控制下飞秒激光的旋转扫描, 解决了目前高深径比、倒锥孔加工困难的问题。将该系统应用于汽车喷油嘴油孔加工, 实现了加工孔径的孔径为 25~800  $\mu\text{m}$ , 孔径误差  $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ ; 在锥度孔加工中可实现微孔锥度  $-5^\circ \sim +5^\circ$ ; 实现了深径比为 20:1 的微孔加工。

**关键词** 光学设计; 飞秒激光加工; 倒锥孔; 高深径比; 喷油嘴

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1122002

## Large Depth-to-Diameter Ratio and Inverted Cone Micro-Hole Machining System with Controllable Trajectory and Its Application

Wang Shan<sup>1,2</sup>, Zhao Wei<sup>1</sup>, Zhao Hualong<sup>1\*</sup>, Zhou Feng<sup>3</sup>, Liu Guoqiang<sup>4</sup>, Yang Xiaojun<sup>4\*\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>FAW Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute, Wuxi 214063, Jiangsu, China;<sup>4</sup>Xi'an Micromach Technology Co., Ltd., Xi'an 710119, Shaanxi, China

**Abstract** A femtosecond fiber laser is extensively used in the field of precision micro-hole manufacturing because of its short pulse width, high instantaneous power, and nonselectivity for processing materials. This study proposes a high-precision trajectory adjustable beam scanning system, which uses a motor to control the angle of the deflection wedge group and the parallel plate group relative to the laser optical axis. Then, it narrows the spot through a focusing lens to achieve precise control of femtosecond laser rotation scanning. Moreover, it solves the current problems of high depth-to-diameter ratio and difficult inverted taper hole machining. The system is applied for processing the oil hole of the automobile fuel injector, and the aperture of the processing aperture is 25–800  $\mu\text{m}$ , and the aperture error is  $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ . A micro-hole taper can be achieved at  $-5^\circ \sim +5^\circ$  in taper hole processing. Micro-hole machining with a depth-to-diameter ratio of 20:1 is achieved.

**Key words** optical design; femtosecond laser processing; inverted cone hole; high depth-to-diameter ratio; fuel injector

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-07-04; 录用日期: 2021-07-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1108000)

通信作者: \*zhaohualong@opt.ac.cn; \*\*yxj@opt.ac.cn

## 1 引言

随着科学技术的进步和工业技术的发展,尤其是医疗、汽车、通信电子、航空航天等领域的器件和部件,对于微孔加工的半径、重复精度、锥度、深径比等都提出了较高的要求,传统的机械钻孔和电火花打孔等方式已经不能满足生产的需要。为了满足高精度、高效率的微孔加工要求,飞秒激光微孔加工成为了一种新型强有力的微孔加工方式。近年来,众多学者对于飞秒激光加工技术都做出了理论及实验探究。Dausinger<sup>[1]</sup>提出了飞秒激光加工中的四种加工方式:单脉冲打孔、多脉冲打孔、环形扫描打孔和螺旋扫描打孔。郭钊<sup>[2]</sup>使用多脉冲打孔的方式在柔性电路板(FPC)上进行打孔,获得了最小 $2.9\ \mu\text{m}$ 的小孔。谢云辉<sup>[3]</sup>提出了一种三光楔打孔的方式,采用螺旋扫描和冲击打孔两种方式在不同材料上打孔,通过比较验证了螺旋打孔形成的微孔具有更好的孔型、表面质量以及锥度参数。

由于国家出台了对燃油汽车发动机排放的国VI标准,也对汽车行业喷油器生产制造提出了新的要求<sup>[4-6]</sup>。喷油器是发动机必不可少的一个重要零件,喷油器的作用是向气缸内喷射燃油,从而降低汽车尾气中有害物质的含量。汽车喷油器喷孔的布局方式对于燃油雾化性能具有至关重要的影响,更小的喷孔直径和分布方式的改善能够大幅提升喷油器喷油性能,避免喷雾撞壁的发生<sup>[7-9]</sup>。传统的喷油嘴多采用直孔结构,为满足国VI颗粒排放标准,目前采用锥形喷油孔。锥形结构的喷孔能够有效避免喷孔附近残留液态燃油,是减少热机状态颗

颗粒物排放的重要方式之一<sup>[10]</sup>。但是目前,以现有的技术无论是机械钻孔还是电火花打孔都不太可能对直径仅为 $0.1\sim 0.3\ \text{mm}$ 的微孔内部形貌进行改变,尤其是在微孔内部加工倒锥孔<sup>[11-13]</sup>。此外,高深径比微孔主要采用钻削加工、电火花加工、激光加工等方法进行加工,但是由于高深径比微孔加工是半封闭式加工,传统的切削加工其微尺寸的钻头难以制作并且极易在加工过程中受到破坏,增加了加工成本,而电火花加工由于当孔深达到一定值时,电蚀碎屑排出困难,难以实现加工大深径比微孔的目的。飞秒激光因其加工微孔表面质量好、控制方式灵活等特点受到了研究人员的广泛关注<sup>[14-15]</sup>。

针对以上问题,在飞秒激光加工微孔的过程中,为了获得锥度可控、大深径比的高质量微孔,本文设计了一种双光楔双平行平板同步控制的光束可控微孔加工系统,通过激光束的旋切扫描,实现了大深径比、倒锥的高质量微孔的加工。

## 2 实验装置与原理

### 2.1 实验装置

实验系统如图1所示,主要包括飞秒激光器、扩束器、偏转光楔组、平行平板组和F-Theta聚焦镜。光源采用掺Yb光纤飞秒激光器(Light Conversion, 立陶宛),中心波长为 $1030\ \text{nm}$ ,脉宽为 $290\ \text{fs}$ ,最大功率为 $20\ \text{W}$ 。入射光束经过扩束器扩束准直后变为准直高斯光束。偏转光楔组由两块楔角较小的光楔组成,平行平板组由两块等厚的平行平板组成,用于控制激光光束的扫描半径和出射光束相对于光轴的夹角。F-Theta聚焦镜可将出射光束的光

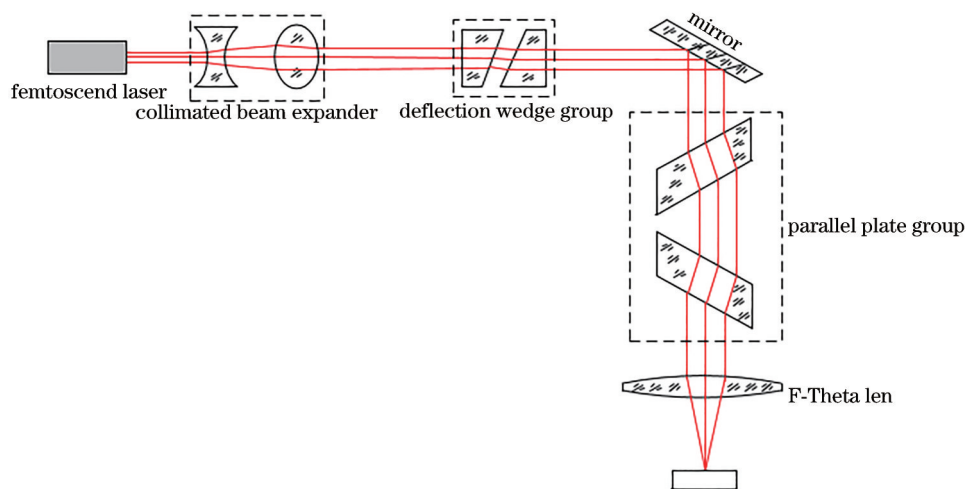


图1 高速轨迹可控光束扫描加工光路图

Fig. 1 Optical path diagram of high speed trajectory controlled beam scanning processing

斑聚焦为需要的光斑大小。

该光学系统的主要原理为:激光器射出的光束先经过扩束器对其进行扩束准直,然后经过偏转光楔组后与光轴产生一个很小的夹角,再经过平行平板组产生一定的平移,最后经过聚焦透镜聚焦于偏离光轴一微小距离的焦平面上。当偏转光楔组和平行平板组同步高速转动时,焦平面上会形成圆形轨迹,通过实时改变光楔相对偏转角度和平行平板相对转动角度可实现大深径比及锥度可控微孔的加工。

### 2.2 实验原理

偏转光楔组由两块楔角较小并有微小气体间

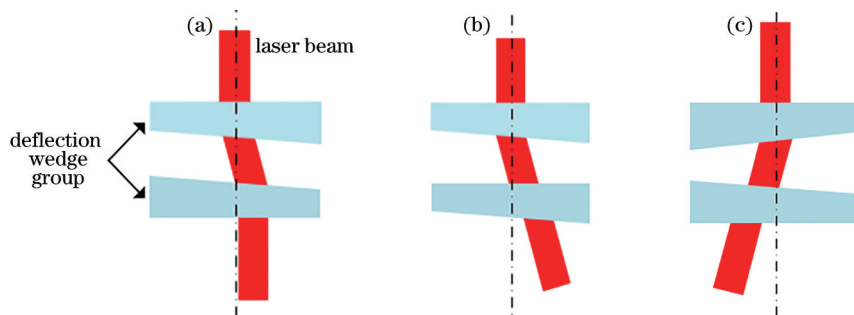


图2 偏转光楔合成角度示意图。(a)相对偏转角度为0°;(b)相对偏转角度为180°;(c)相对偏转角度为360°

Fig. 2 Schematic diagram of combined angle of deflection wedge. (a) Relative deflection angle is 0°; (b) relative deflection angle is 180°; (c) relative deflection angle is 360°

隙的光楔组成,两个光楔可以绕光轴相对转动,光束经过光楔后会与光轴产生一个夹角,该夹角等于两个偏转光楔的合成角度。当两个偏转光楔的楔角方向相反时,产生的偏转角度为0°,双光楔的作用相当于平行平板,光线仅产生上下位置的微小偏移量。当两个偏转光楔的楔角方向相同,即两个偏转光楔的相对转动为180°时,产生的偏转角最大为单光楔产生偏转角的2倍。若两个光楔相对转动角度为360°,则产生反向的最大偏转角。图2为偏转光楔合成角度示意图。

偏转光楔组由两块楔角较小并有微小气体间

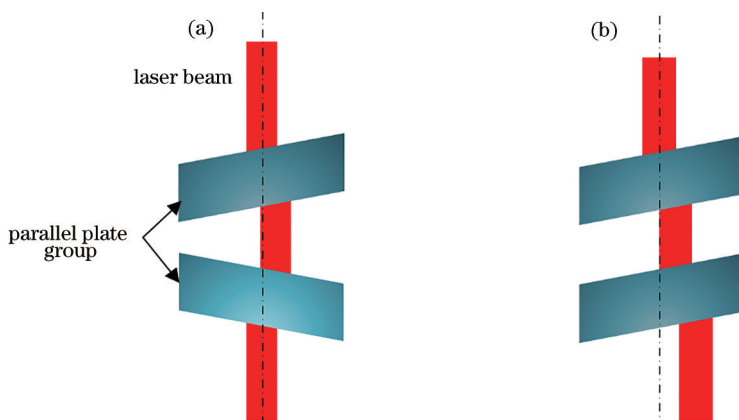


图3 平行平板组偏移量示意图。(a)最小偏移量状态;(b)最大偏移量状态

Fig. 3 Schematic diagram of offset of parallel plate group. (a) Minimum offset state; (b) maximum offset state

隙的光楔组成,两个光楔可以绕光轴相对转动,光束经过光楔后会与光轴产生一个夹角,该夹角等于两个偏转光楔的合成角度。当两个偏转光楔的楔角方向相反时,产生的偏转角度为0°,双光楔的作用相当于平行平板,光线仅产生上下位置的微小偏移量。当两个偏转光楔的楔角方向相同,即两个偏转光楔的相对转动为180°时,产生的偏转角最大为单光楔产生偏转角的2倍。若两个光楔相对转动角度为360°,则产生反向的最大偏转角。图2为偏转光楔合成角度示意图。

角度一定时,若两平板平行,则偏移量最大。当两个平板互补(平移量为0时),两者之间有相互旋转时,在0~90°的范围内,平板偏移量会随着相对转角的增大而增大,图3为平行平板组偏移量示意图。

$$P = \frac{h \sin \left[ \theta_1 - \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right]}{\cos \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right]} \sin \phi, \quad (1)$$

加工孔径由偏转光楔合成角和聚焦镜焦距来决定,加工孔锥度由平行平板总厚度、光束直径、下光楔到聚焦镜的距离和聚焦镜的焦距决定,表示为

$$r = f \tan [2\theta_2 (n - 1) \sin \varphi], \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \left\{ \frac{h \sin \left[ \theta_1 - \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right] \sin \phi}{f \cos \left[ \arcsin \left( \frac{\sin \theta_1}{n} \right) \right]} \right\} - \arctan \left( \frac{d}{2f} \right), \quad (3)$$

式中: $f$ 为 F-Theta 聚焦镜焦距; $\theta_2$ 为偏转光楔角; $\varphi$ 为偏转光楔相对于初始合成偏转角为 0 时两光楔的相对转角; $\beta$ 为加工孔锥度; $d$ 为激光光束直径。

### 3 系统指标参数确定

#### 3.1 微孔直径

系统可加工孔径大小与激光波长、光束直径、聚焦镜焦距、偏转光楔角等因素均有关。孔深度增加后,由于激光束在加工过程中会向下进给,加工孔正面容易发生挡光现象,导致无法继续向下加工。聚焦镜在系统中作为一个独立模块存在,针对不同的加工需求,可以匹配不同焦距的聚焦镜以满足要求,因此在高速扫描轨迹可控的大深径比倒锥微孔加工系统中可以通过匹配聚焦镜与光楔参数,再结合优化其他参数,达到加工所需孔

径的目的。如表 1 所示,以常用的  $0.1^\circ \sim 0.7^\circ$  光楔为例,配合计算焦距分别为 60~80 mm 聚焦镜,以本系统所用光楔折射率  $n=1.458$  为例,根据式(1)计算高速轨迹可控光束扫描加工系统的最大加工直径,见表 1。

表 1 常用光楔最大加工直径

Table 1 Maximum machining diameter of common optical wedge

Wedge angle / ( $^\circ$ )	$f=$	$f=$	$f=$	$f=$
	60 mm	80 mm	100 mm	150 mm
Maximum machining diameter $\Phi$ / mm				
0.1	0.096	0.128	0.160	0.240
0.2	0.192	0.256	0.320	0.480
0.3	0.288	0.384	0.480	0.720
0.5	0.480	0.640	0.800	1.200
0.7	0.671	0.900	1.120	1.680

#### 3.2 微孔锥度

在实际应用中通常需要加工锥度可控的微孔,此系统通过控制双光楔与平行平板的同步运动来实现激光束在加工过程中的同步动态平移,并且改变偏转角可使光束横移量发生改变,从而实现加工孔锥度精准可控,突破传统电火花加工较难实现的超精密、表面完整性良好的大锥度系数倒锥微小孔加工。图 4 为飞秒激光加工不同孔型的原理图。

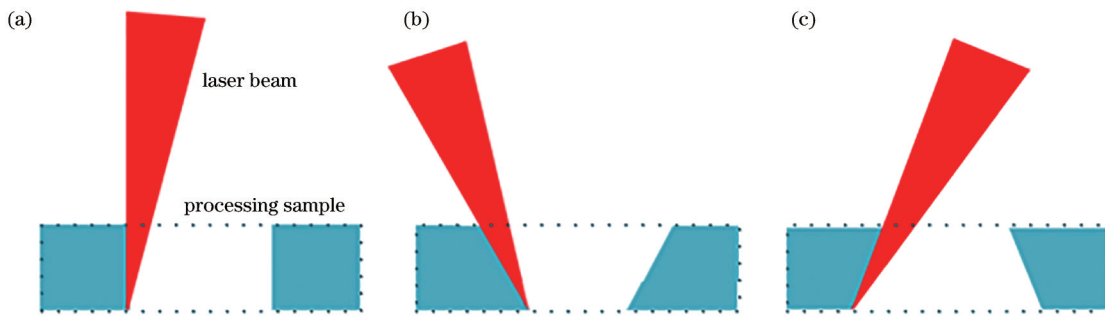


图 4 飞秒激光加工不同孔型原理图。(a)圆柱孔;(b)正锥孔;(c)倒锥孔

Fig. 4 Schematic diagram of different hole types processed by femtosecond laser. (a) Cylindrical hole; (b) positive taper hole; (c) inverted taper hole

加工大锥度孔,应采用短焦,这里选择焦距为 60 mm 的聚焦镜进行计算,由式(4)可得锥度极限为  $-7.75^\circ$ ,满足可加工孔径锥度为  $-5^\circ \sim +5^\circ$  的要求。

#### 3.3 微孔深径比

影响制孔深径比的主要原因是制孔过程中小孔效应带来的剥离物引导困难和光束在加工进给

过程中容易出现挡光而造成加工能力下降。通过控制同步旋转双平板间的相位夹角,实现光束横向位移量的实时调整,解决高深径比制孔时的挡光问题;其次,结合光束旋切扫描的规律,制定合理的扫描路径,改善激光加工过程中的能量分布。同时,为了实现更高的制孔深径比,需要针对孔径及材料厚度的需求,在制孔过程中调整光束可变轨迹,避

免光束随着孔深的增加,因边缘挡光(扫边)而出现孔入口变大、孔深增加困难的情况。

以加工圆柱孔为例,深径比与聚焦镜的焦距成正比,与光斑直径成反比,这里选择焦距为 150 mm 进行深径比的计算。图 5 为圆柱孔深孔加工示意图。

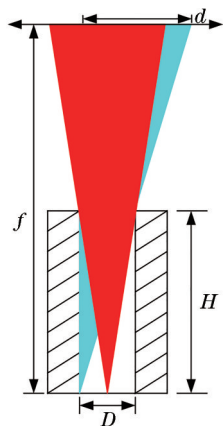


图 5 圆柱孔深孔加工示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cylindrical hole deep hole processing

则可以推导出:

$$\frac{f}{H} = \frac{d}{D} \quad (5)$$

由式(5)可推导出深径比为

$$\frac{H}{D} = \frac{f}{d} \quad (6)$$

由式(6)可知,当  $f=150$  mm 时,若光束直径  $d=5.5$  mm,则理论上该系统可满足深径比  $H/D \approx 27$ 。

## 4 结果分析与讨论

使用控制变量法探究扫描转速、激光重复频率和其余加工参数对加工效果的影响,将得到的最优化加工参量应用于 1000 个喷油嘴的喷孔加工,其壁

厚为 1 mm,每个喷油嘴加工 8 个喷孔,从其中随机抽取 100 个喷油嘴进行剖检,采用 HEXAGON 的三坐标测量机(测量准确度为  $1.9 \mu\text{m}$ )对油嘴进出口孔径与出口孔径进行测量,结果显示,孔径精度均  $\leq \pm 2 \mu\text{m}$ ,锥度系数为 0~3 可控,均符合喷油嘴设计指标要求。

以加工喷孔正面直径 0.18 mm,反面直径 0.2 mm 为例,根据计算选择楔角为  $0.1^\circ$  的光楔与焦距为 60 mm 的聚焦镜,随机选择实验样本中的 1 个喷油嘴,测试其孔径结果与锥度系数如表 2 所示。

表 2 实验样本喷油嘴孔径数据

Table 2 Nozzle diameter data of experimental sample

Hole No.	In diameter / $\mu\text{m}$	Out diameter / $\mu\text{m}$	K factor
1	182	211	2.9
2	182	211	2.9
3	182	212	3.0
4	182	212	3.0
5	181	211	3.0
6	182	212	3.0
7	181	210	3.0
8	182	210	2.8

表 2 中,喷油嘴的 K 系数是指喷孔的锥度系数,其具体定义为

$$K = (D_1 - D_2) / 10, \quad (4)$$

式中:  $D_1$  和  $D_2$  分别是喷孔的入口和出口孔径,单位均是  $\mu\text{m}$ 。

图 6 为任意抽取的一个油嘴剖面图,图 6(a)为油嘴剖面图,图 6(b)为油嘴喷油出口局部放大图,图 6(c)为油嘴喷油入口局部放大图,喷孔的详细尺寸见表 1。从喷油嘴加工效果图可以看出,油嘴无明显重铸层,油嘴出口无明显热影响区,而油嘴入口存在轻微激光烧蚀引起的热影响区,表面形貌良好无明显的微裂纹,对加工喷油嘴进行每分钟流量

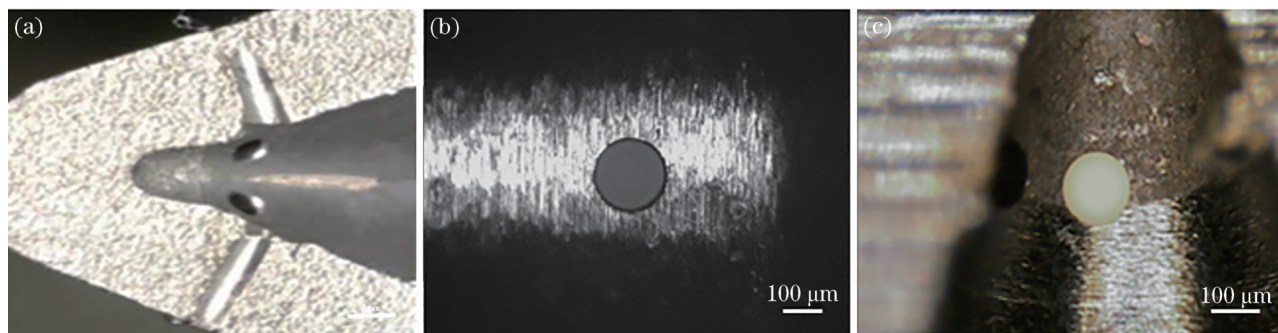


图 6 喷油嘴喷孔加工效果。(a)油嘴剖面图;(b)喷油嘴出口放大图;(c)喷油嘴入口放大图

Fig. 6 Nozzle hole processing effect. (a) Profile of nozzle; (b) enlarged view of nozzle outlet; (c) enlarged view of nozzle inlet

测试,其流量稳定性能保持在 $\leq \pm 1.2\%$ ,能够满足喷嘴的设计指标。

对平板样件以及喷嘴进行打孔测试,在不同工作状态下可实现的打孔孔径范围为 $25\sim 800\ \mu\text{m}$ ,其孔径误差 $\leq \pm 2\ \mu\text{m}$ 。目前可在不锈钢片上实现最小直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的微圆孔加工,采用楔角为 $0.1^\circ$

的光楔匹配焦距为 $60\ \text{mm}$ 的聚焦镜,图7为加工的 $25\ \mu\text{m}$ 微圆孔图,圆孔略有重铸层,孔口边缘有毛刺,微孔表面质量仍有待提高,因此可以考虑波长较短的绿光激光器,选择聚焦光斑更小的聚焦镜,并结合辅助吹气装置实现表面质量更高的微圆孔。

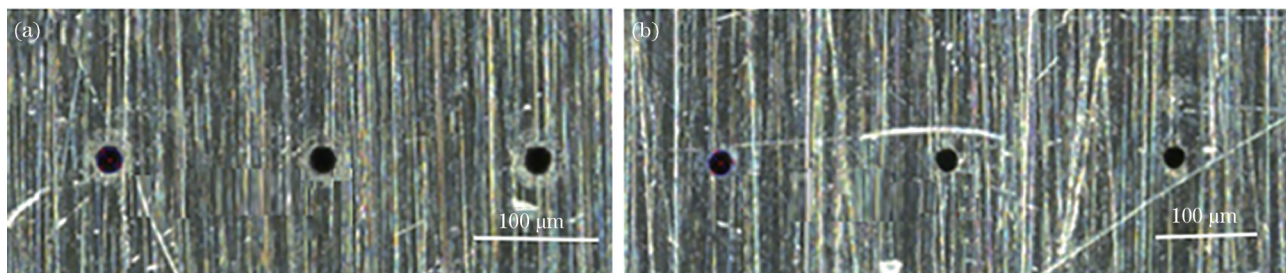


图7 直径为 $25\ \mu\text{m}$ 的微圆孔图。(a)微圆孔正面;(b)微圆孔背面

Fig. 7 Micro-hole with a diameter of  $25\ \mu\text{m}$ . (a) Front of micro-hole; (b) back of micro-hole

另外,由于孔型锥度受多因素影响,通过调用影响锥度的参数(平板偏移量、焦距、功率、重叠率等)设计多参量调控实验,根据测试结果选择转速为 $5000\ \text{r/min}$ ,打孔功率为 $3.5\ \text{W}$ ,重复频率为

$100\ \text{kHz}$ ,使用焦距为 $60\ \text{mm}$ 的聚焦镜,实现了 $-5^\circ$ 锥孔和 $+5^\circ$ 锥孔。图8为加工得到的 $-5^\circ$ 锥孔和 $+5^\circ$ 锥孔,锥度控制精度 $\leq 0.1^\circ$ 。倒锥孔剖面效果如图9所示。

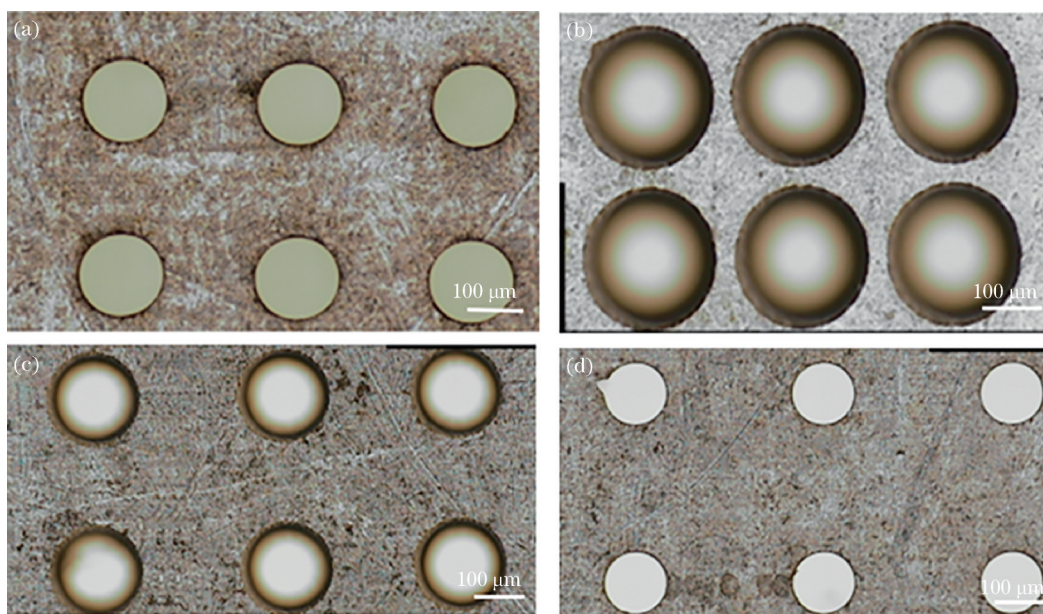


图8 锥孔加工效果。(a) $-5^\circ$ 倒锥孔正面;(b) $-5^\circ$ 倒锥孔反面;(c) $+5^\circ$ 正锥孔正面;(d) $+5^\circ$ 正锥孔反面

Fig. 8 Taper hole processing effect. (a) Front side of the  $-5^\circ$  inverted taper hole; (b) reverse side of the  $-5^\circ$  inverted taper hole; (c) front side of the  $+5^\circ$  positive taper hole; (d) reverse side of the  $+5^\circ$  positive taper hole

最后,通过光束扫描路径规划和辅助气流调整实现高深径比微孔激光加工,减小加工过程中小孔效应,目前可实现孔径为 $0.3\ \text{mm}$ ,深径比为 $20:1$ 的微孔加工。图10为深径比 $20:1$ 的微孔加工效果

图。从图中可以看出,此系统加工的高深径比微孔的内壁光滑无明显重铸层,孔口无明显微裂纹,在满足高质量微孔加工的前提下,实现了高深径比微孔的加工。

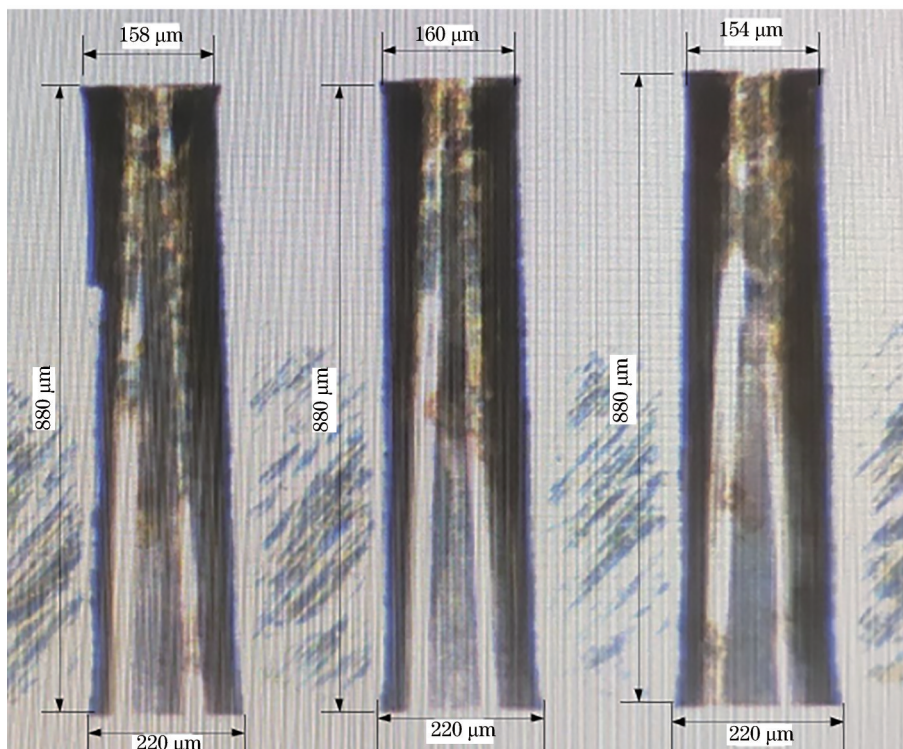


图 9 锥度为 $-5^\circ$ 的倒锥孔剖面效果

Fig. 9 Sectional view of inverted taper hole with a taper of  $-5^\circ$

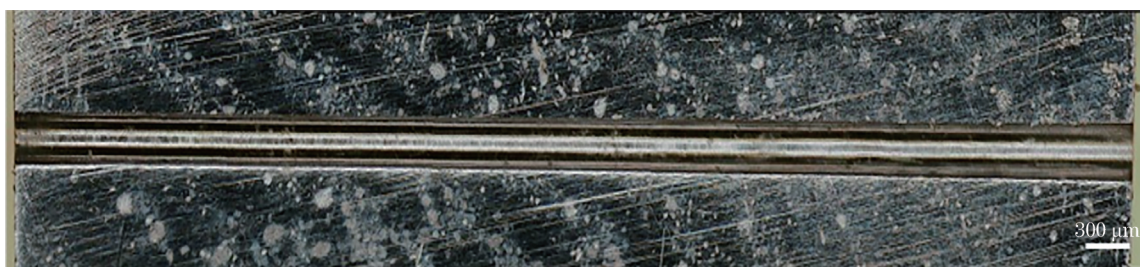


图 10 深径比 20:1 微孔剖面图

Fig. 10 Sectional view of micro-hole with aspect ratio of 20:1

## 5 结 论

根据目前高深径比与倒锥微孔的加工需求,本文提出了一种双光楔双平行平板的高速轨迹可控光束扫描系统,通过电机控制双光楔与双平行平板的相对运动实现激光光束的高速旋切扫描,并且通过优化加工工艺,实现了微孔加工孔径范围 $25\sim 800\ \mu\text{m}$ ,孔径误差 $\leq \pm 2\ \mu\text{m}$ ,锥度 $-5^\circ\sim 5^\circ$ 可控,深径比 20:1 的微孔加工。将该系统应用于喷油器喷油孔加工得到的喷孔形貌良好,锥度系数一致,具有广泛的应用前景。研究表明:在保证飞秒激光微孔加工质量的前提下,该系统加工的微孔具有锥度可控、大深径比的特点,为飞秒激光微孔加工提供了一种新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] Dausinger F. Femtosecond technology for precision manufacturing: fundamental and technical aspects[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4830: 471-478.
- [2] 郭钊. 不同偏振光对 FPC 打孔加工技术研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.  
Guo Z. Study on drilling technology of FPC with different polarized light[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017.
- [3] 谢云辉. 激光打孔光楔扫描光学系统的设计与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
Xie Y H. Design and research of laser perforated wedge scanning optical system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

- [4] 杨昆昊, 夏赞宇, 何芑, 等. 机动车燃油质量及尾气排放与北京市大气污染的相关性[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(3): 304-317.  
Yang K H, Xia Z Y, He P, et al. Correlation of fuel quality and emissions of motor vehicle with atmospheric pollution in Beijing[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34(3): 304-317.
- [5] 凌建寿. 汽油机汽车整车排放与燃油标准化管理[J]. 中国标准化, 2005(5): 20-23.  
Ling J S. Emission and fuel standardization management of gasoline engine vehicles[J]. China Standardization, 2005(5): 20-23.
- [6] 田春芝, 刘惠. 汽油车排放控制措施[J]. 北京汽车, 2000(5): 20-24.  
Tian C Z, Liu H. Emission control measures for gasoline vehicles[J]. Beijing Automotive Engineering, 2000(5): 20-24.
- [7] 谢宏斌, 高崑, 蒋兆杰, 等. 基于 BOOST 电路的高压共轨喷油器驱动电路设计与优化[J]. 车用发动机, 2020(5): 73-79, 86.  
Xie H B, Gao W, Jiang Z J, et al. Design and optimization of driving circuit for high pressure common rail injector based on boost circuit[J]. Vehicle Engine, 2020(5): 73-79, 86.
- [8] 吴坚, 陈泓, 杜家坤, 等. 直喷汽油机多孔喷油器喷雾闪急沸腾特性[J]. 内燃机学报, 2019, 37(6): 529-535.  
Wu J, Chen H, Du J K, et al. Characteristics on flash-boiling spray of multi-hole injector for GDI engine[J]. Transactions of CSICE, 2019, 37(6): 529-535.
- [9] Price C, Hamzehloo A, Aleiferis P, et al. Numerical modelling of fuel spray formation and collapse from multi-hole injectors under flash-boiling conditions[J]. Fuel, 2018, 221: 518-541.
- [10] 王锋, 罗建军, 李明. 飞秒激光高精度加工柴油机喷油嘴倒锥孔法[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0414003.  
Wang F, Luo J J, Li M. High-precision method of machining taper holes of diesel engine nozzle with femtosecond laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0414003.
- [11] 张丽敏, 周峰, 吴广领, 等. 超快激光加工喷油器喷孔应用技术研究[J]. 汽车工艺师, 2017(1): 59-63.  
Zhang L M, Zhou F, Wu G L, et al. Research on application technology of ultra-fast laser processing fuel injector nozzle hole[J]. Auto Manufacturing Engineer, 2017(1): 59-63.
- [12] 宋昶, 杨小君, 赵卫, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光深微孔加工方法[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0814001.  
Song C, Yang X J, Zhao W, et al. Depth-micro laser drilling methods based on spatial light modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 0814001.
- [13] 赵华龙, 周仁魁, 赵卫, 等. 飞秒激光倒锥微孔加工的反射式扫描装置设计[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0914006.  
Zhao H L, Zhou R K, Zhao W, et al. The design of reflective scanning device for drilling the inverted cone micro-hole with femtosecond laser pulses[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0914006.
- [14] 阿占文, 陈灵灵, 吴影, 等. 超快激光旋光钻孔孔径和锥度的控制[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802017.  
A Z W, Chen L L, Wu Y, et al. Controlling of diameter and taper in ultrafast laser helical drilling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802017.
- [15] 郭敏超, 王明娣, 张胜江, 等. FR-4 覆铜板飞秒激光微孔加工工艺研究[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1202008.  
Guo M C, Wang M D, Zhang S J, et al. Techniques for femtosecond laser processing of micro-holes in FR-4 copper clad laminate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1202008.